

0-772958

На правах рукописи



Хайруллин Ирек Равилевич

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОПАСНОСТИ ПОРАЖЕНИЯ ЧЕЛОВЕКА
ТЕПЛОВЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ ОГНЕННОГО ШАРА
ПРИ ПОЖАРАХ НА ХИМИЧЕСКИХ И
НЕФТЕХИМИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЯХ**

**05.26.03 – Пожарная и промышленная безопасность
(в химической отрасли промышленности)**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань – 2008

Работа выполнена на кафедре «Машины и аппараты химических производств» Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Казанский государственный технологический университет»

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Теляков Эдуард Шархиевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Ляпин Николай Михайлович

кандидат технических наук
Свиридов Станислав Иванович

Ведущая организация – ОАО «Нижнекамскнефтехим»

Защита состоится «17» ДЕКАБРЯ 2008 г. в 15³⁰ час. на заседании диссертационного совета Д 212.080.02 при ГОУ ВПО «Казанский государственный технологический университет» по адресу: 420015, г. Казань, ул. К. Маркса, 68, КГТУ, зал заседаний Ученого совета (А-330).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Казанского государственного технологического университета.

Электронный вариант автореферата размещен на сайте Казанского государственного технологического университета (www.kstu.ru).

Автореферат разослан «14» ноября 2008

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА КГУ



0000438955

Ученый секретарь
диссертационного совета

А.С. Сироткин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**Актуальность.**

На современных химических и нефтехимических предприятиях хранятся и обращаются огромные количества энергонасыщенных веществ (мономерный винилхлорид, сжиженные газы – СУГ, широкие фракции легких углеводородов – ШФЛУ и т.д.). Так на нефтехимических предприятиях, связанных с производством этилена, суммарный объем парков хранения СУГов достигает десятков тысяч тонн, при емкости отдельного резервуара 600 м³. В этих условиях аварии, связанные с возникновением пожаров, могут иметь наиболее катастрофические последствия для окружающей среды (ОС), обслуживающего персонала и рядом расположенных объектов.

Опасными факторами, характерными для аварий с пожарами на данных объектах, является тепловое воздействие и тепловое излучение при возникновении пожаров – вспыхке (горение стехиометрических газопаровоздушных смесей), пожаров пролива горючих жидкостей (ГЖ), факельном горении истекающих из оборудования газов и паров, огненных шарах. Последний вариант развития аварии достаточно специфичен и относительно мало изучен. Это объясняется невозможностью крупномасштабного исследования данного явления, сложностью фиксации физических закономерностей непосредственно в процессе аварии из-за его случайной природы и относительно кратковременности самого события (10÷40 сек.).

Эволюция огненного шара (ОШ) может происходить по двум сценариям. По первому сценарию зажигание топлива частично перемешанного с воздухом происходит на начальной стадии аварийного выброса, при этом богатая смесь будет гореть в диффузионном режиме. По второму – зажигание происходит с задержкой, при этом значительная часть топлива перемешивается с воздухом, продукты горения и вовлекаемого воздуха интенсивно расширяются и объем горящего облака значительно превосходит начальный объем горючего газа. Поэтому последний сценарий является наиболее опасным по интенсивности теплового воздействия на окружающие объекты.

Под огненным шаром понимается специфическая структура паровоздушной смеси, которая образуется при залповом выбросе значительного количества (от одной до нескольких сотен тонн) сжатого или сжиженного газа в нестесненное (открытое) пространство при неблагоприятных атмосферных условиях (отсутствие ветра) с последующим зажиганием ОШ от постороннего источника. Горение данного облака характеризуется возникновением над земной поверхностью на определенной высоте фронта пламени примерно сферической формы, сопровождающееся тепловым излучением, которое оказывает поражающее воздействие на людей и на объекты, находящихся в зоне поражения.

Практически во всех теоретических моделях оценка интегральных характеристик ОШ проводится по тепловому балансу между химической энергией топлива и энтальпией высокотемпературных продуктов горения стехиометрической газовоздушной смеси.

Разработка мероприятий по обеспечению пожарной безопасности таких объектов в соответствии с действующим законодательством должна базироваться на детальной оценке их пожарной опасности. Методы оценки риска поражения по современным представлениям должны основываться на количественной оценке, как самих поражающих факторов, так и степени их воздействия на поражаемые объекты,

в том числе и биологические в динамике эволюции ОШ. В данном плане большой научный и практический интерес представляет имитационное моделирование (количественное) воздействия излучения ОШ на окружающую среду. Следует отметить, что оценка рисков, сопутствующим возможным гипотетическим авариям, предполагает проведение анализа достаточно большого количества сценариев развития аварий. Их число может измеряться десятками и сотнями (например, в случае перевозки СУГов железнодорожным или автомобильным транспортом).

Поэтому к математической модели, описывающей процесс развития аварии (в том числе и при возникновении ОШ), помимо требования точности и адекватности должно предъявляться и требование по быстродействию.

Решение поставленной задачи позволяет прогнозировать опасные зоны поражения и обосновывать управленческие решения по ликвидации последствий аварии. В настоящее время для оценки и прогнозирования теплового поражения в ГОСТированных методах применяется эмпирические формулы для оценки интегральных характеристик горения ОШ, а в качестве критерия поражения принята вероятность только летального исхода. Однако в реальных аварийных ситуациях объем ОШ и, соответственно, интенсивность излучения изменяются в несколько раз, кроме того, по мнению медиков для организации помощи нужна информация не только о количестве пострадавших, но и о их степени поражения. Эффективность этой помощи в условиях острого дефицита времени зависит от скорости обработки и получения информация по оценке количества пострадавших различной степени тяжести. Для прогнозирования опасности теплового поражения необходимы данные по корреляционным отношениям между различными термодинамическими и медицинскими критериями. Состояние анализируемой проблемы как в части математического моделирования эволюции ОШ, так и в части оценки термических поражений мотивировало дальнейшее исследование в этой области и выбор цели и задач исследования.

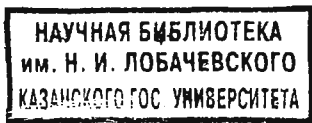
Целью работы является повышение пожарной безопасности на химических и нефтехимических предприятиях за счет обеспечения качества выполнения проектных работ (в части разработки мероприятий по предупреждению ЧС, пожарной безопасности и оценки степени рисков) при использовании сопряженной вычислительной модели системы «источник излучения – биообъект».

В задачи исследования входило:

1. Построение динамической вычислительной модели горения углеводородных газов в структуре огненного шара;
2. Установление корреляционных отношений между термодинамическими и медицинскими критериями теплового поражения человека различной степени тяжести;
3. Прогнозирование опасных зон теплового поражения биообъектов.

Научная новизна проведенных исследований может быть сформулирована в виде следующих ключевых положений:

- 1) проведена оценка совместного влияния физико-химических параметров на нормальную скорость горения по имеющимся в литературе фундаментальным экспериментальным данным о влиянии каждого из параметров на стандартную скорость горения;
- 2) разработана динамическая вычислительная модель двухзонного горения газов в структуре ОШ с нормальным распространением пламени на поверхности и частично перемешанных компонентов горючей смеси в ядре ОШ;



3) обоснованы новые пробит-функции для прогнозирования вероятности термических ожогов различной степени тяжести при пожарах на химических и нефтехимических предприятиях.

В реализации поставленных целей и задач принимал участие коллектив специалистов в области нестационарного теплообмена в химически реагирующих системах, теории горения газов, управления, математического моделирования, вычислительных методов, информатики и медицины.

Личный вклад автора состоит в исследовании комплексного влияния физических и химических параметров на нормальную скорость распространения пламени на поверхности ОШ, обосновании пробит-функции для различных степеней термического поражения, разработке метода прогнозирования опасных зон теплового поражения на основе компьютерного моделирования процесса теплопередачи в системе «источник излучения – биообъект».

Основные результаты, выносимые на защиту:

- ✓ динамическая вычислительная модель горения углеводородных топлив в структуре огненного шара;
- ✓ пробит-функция для расчета вероятности возникновения термических ожогов II степени;
- ✓ автоматизированный вычислительный метод прогнозирования зон поражения человека тепловым излучением огненного шара.

Практическая значимость состоит в том, что:

- обобщением данных ведущих отечественных и зарубежных ожоговых центров определена пробит-функция для критерия теплового поражения «ожог II степени», использование которой повышает информативность анализа последствий аварий (пожаров) и действенность принимаемых организационно-технических мероприятий;
- автоматизированный комплекс программ «источник излучения – биообъект», повышающий эффективность проектных работ в части разработки разделов мероприятий по предупреждению ЧС, пожарной безопасности и оценки степени рисков, внедрен в ряде проектных организаций (ООО НПФ «Реконструкция», ООО «Эксперт Бюро» и ПИ «Союзхимпромпроект» КГТУ).

Публикации. Основные положения диссертационной работы изложены в 7-х публикациях, в том числе 2 статьи опубликованы в научных изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ на соискание ученой степени доктора и кандидата наук, а так же в тезисах материалов 5 научных конференций. В названных публикациях полностью отражены основные положения диссертации.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, трех глав, выводов, списка использованных источников. Общий объем диссертации 93 страницы машинописного текста, включая 19 рисунков, 7 таблиц и списка литературы из 67 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

ВВЕДЕНИЕ

Во введении выделена актуальность проблемы, сформулирована цель работы, показана научная новизна и ее практическая значимость, представлены основные результаты работы, выносимые на защиту, описана структура диссертации.

В подавляющем большинстве экспериментальных моделей основное внимание уделяется изучению интегральных характеристик ОШ – максимального диаметра

горящего облака – D_s , максимальному времени горения – t_s . Зависимость перечисленных характеристик от массы топлива M_0 в ОШ представляется в виде степенных функций:

$$D_s = a_1 M_0^{b_1}, \quad t_s = a_2 M_0^{b_2}. \quad (1)$$

Сравнительный анализ моделей ОШ, разработанных различными авторами, показывает, что независимо от диапазона массы топлива, сорта горючего и условий проведения экспериментов, все зависимости максимального диаметра от массы топлива имеют один и тот же показатель b_1 , близкий к 1/3. Объясняется это тем, что углеводородные газы имеют близкие теплоты сгорания, температуры горения и, следовательно, степени расширения при горении. Таким образом, объем ОШ определяется в основном полным количеством выделяющегося тепла, пропорционального массе топлива. А диаметр ОШ пропорционален кубическому корню объема. Время горения, полученное разными авторами, согласуется значительно хуже. Существуют практические рекомендации, согласно которым для ОШ малого масштаба (M_0 менее 10 кг) показатель степенной функции b_2 равен 1/6, а для крупного масштаба – 1/3.

На основании анализа многочисленных реальных аварий с выбросом и зажиганием углеводородных топлив, описанных в известных монографиях Маршалла, Бейкера, Бесчастного, условия и допущения образования и горения ОШ представляет следующим образом:

- ОШ представляет собой большой объем (более 1 т) сгорающей массы топлива или парового облака, поднимающегося с поверхности земли;

- появлению ОШ предшествует полное разрушение (разгерметизация) технологического оборудования химических производств со сжиженным газом, выброс паро-капельной смеси в открытое пространство, частичное смешение с окружающим воздухом за счет турбулентной энергии вскипающей жидкости, зажигание от постороннего источника;

- во всех эмпирических и теоретических моделях предполагается, что вся масса топлива сгорает с кислородом воздуха в стехиометрическом соотношении. При этом температура внутри ОШ поднимается от начальной до температуры продуктов горения. Распределение температуры по сечению ОШ принимается практически равномерными;

- воспламенение облака, содержащего горючий газ, в ряде случаев переходит во взрыв. Одна из основных причин – наличие ограниченного пространства (здания, сооружений и т.д.). Закономерности перехода горения во взрыв до конца не изучены;

- взрыв парового облака и пожар огненный шар близки по условиям возникновения. Поэтому специалистами МЧС, изучавших на основе статистических данных это явление, разработан единый алгоритм расчета медицинских последствий аварий с образованием пожаров огневых шаров или взрывов парового облака. Очевидно эта методика может применяться к прогнозированию последствий горения или взрыва других энергоемких веществ (в том числе и ядерных) и материалов, так как пробит-функция (probity-function), используемая в ГОСТ Р 12.3.047-98, получена Эйзенбергом в 1946 г. после обработки результатов воздействия теплового излучения атомных взрывов на человека.

Такова качественная картина образования ОШ. Однако в последнее время в литературе опубликованы количественные результаты исследований по горению газовых смесей, в том числе и в структуре сферического пламени, проводимые в течение последних двух десятилетий в Институтах химической физики (ИХФ)

высоких температур (ИВТ), проблем механики (ИПМ) Российской Академии Наук. Эти результаты могут объяснить не только механизм такого сложного явления как ОШ, но, самое главное, служить основой построения динамических моделей горения ОШ.

ГЛАВА 1. ФИЗИЧЕСКИЕ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ГОРЕНИЯ ОГНЕННЫХ ШАРОВ

В 1-й главе проводится анализ двух направлений исследовательских работ, раскрывающих механизм зажигания и горения ОШ:

- по влиянию подогрева и состава горючей смеси на скорость распространения плоского пламени углеводородных газовых смесей;
- по генерации турбулентности в сферических пламенах при зажигании неподвижных газовых смесей от точечного источника.

Результаты исследований по первому направлению представлены в книге «Законы горения», (М., 2006 г.) под редакцией чл.-корр. РАН Полежаева Ю.В.

Механизм кинетики химических реакций при турбулентном горении углеводородных газов в объеме ОШ остается до конца не выясненным. В большинстве экспериментальных и теоретических моделей горения газовых смесей оценивается увеличение скорости турбулентного горения по сравнению с нормальной скоростью ламинарного пламени, которая является стандартной характеристикой горючих газовых смесей – S^0_B . Анализ фундаментальных результатов исследования влияния различных физико-химических факторов на нормальную скорость распространения пламени необходим для построения физических и математических моделей горения ОШ. Основными факторами является начальный подогрев смеси и концентрации горючего и окислителя.

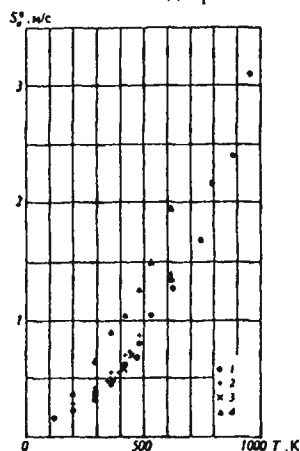


Рис. 1. Влияние степени подогрева на нормальную скорость горения углеводородов: 1 – CH_4 ; 2 – C_3H_8 ; 3 – C_4H_{10} ; 4 – C_2H_4

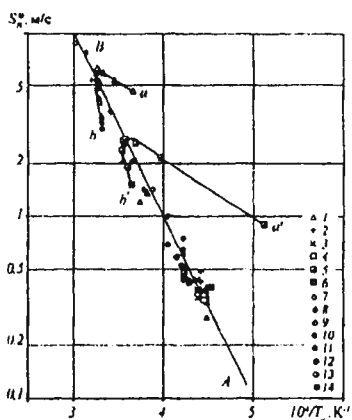


Рис. 2. Обобщение данных по S_B^0 для топливных смесей $\text{C}_n\text{H}_m\text{-O}_2\text{-N}_2$ и $\text{C}_n\text{H}_m\text{-воздух}$: 1 – CH_4 ; 2 – C_2H_6 ; 3 – C_3H_8 ; 4 – C_4H_{10} ; 5 – C_6H_{14} ; 6 – C_6H_{18} ; 7 – C_2H_2 ; 8 – C_2H_4 ; 9 – C_3H_6 ; 10 – C_4H_8 ; 11 – C_6H_6 ; 12 – C_7H_4 ; 13 – C_4H_4 ; 14 – C_4H_8

На рис. 1 показана экспериментальная зависимость скорости распространения пламени от начальной температуры смеси. При возрастании температуры исходной смеси с 273K до 950K нормальная скорость горения увеличивается на порядок.

Проведенный автором длительный поиск в научной литературе 1950+1970-х годов позволил найти данные по значениям нормальной скорости распространения пламени – S_B^0 для полутора десятков стехиометрических смесей углеводородов с O_2 или воздухом в зависимости от температуры. Эта зависимость в полулогарифмических координатах представлена на рис. 2 в виде прямой АВ, описываемой формулой

$$S_B^0 = 9,92 \cdot 10^3 \exp(-2,3 \cdot 10^3/T_a). \quad (2)$$

Вдоль линии АВ на рис. 2 лежат точки, отвечающие смесям стехиометрического состава, температура горения которых менялась путем ввода в смесь инертных разбавителей (азота или аргона).

Известно, что снижать температуру горения можно путем увеличения или уменьшения концентрации горючего в горящей смеси. Однако оказалось, что при концентрации горючего, отличной от стехиометрической, нормальная скорость горения S_B^0 отклоняется от значений, отвечающих формуле (2), причем эти отклонения могут быть в обе стороны. При постепенном увеличении количества горючего, вводимого в поток окислителя, т.е. если идти от «бедных» смесей к «богатым», сначала величина нормальной скорости горения S_B^0 превышает значения, ожидаемые при данной температуре, и точки S_B^0 ложатся выше стехиометрической линии АВ, затем рост S_B^0 с ростом концентрации горючего и T_a замедляется и в таком состоянии, близком к стехиометрическому, происходит пересечение линии АВ. Дальнейшее увеличение расхода горючего переводит процесс в область «богатых» смесей, в которой имеет место довольно слабое снижение температуры вследствие того, что несгораемое из-за недостатка окислителя топливо играет роль балласта, что сопровождается резким падением нормальной скорости горения S_B^0 .

Из приведенного анализа по влиянию физико-химических факторов на стандартную нормальную скорость горения следует два важных вывода, объясняющих качественную картину горения углеводородных газов в структуре ОШ:

- большинство углеводородных воздушных смесей имеют практически одинаковые кинетические параметры химического превращения, а, следовательно, одинаковую температуру и скорость распространения пламени. Поэтому в соответствии с формулой (1) эволюция ОШ зависит только от массы аварийного выброса топлива, и в меньшей степени от его состава;

- на скорость объемного горения топлива в ОШ и динамику изменения его геометрических размеров основное влияние оказывает концентрация горючего и его температура.

В соответствии с мнением западных специалистов в химической и нефтеперерабатывающей промышленности огненные шары возникают только в результате полного разрушения резервуаров, содержащие СУГ, пропаны, пропилен или мономерный винилхлорид. Образованию ОШ предшествует период выброса и рассеивание парового облака, а сам огненный шар зарождается в момент контакта парового облака с источником зажигания. Одной из причин скоротечности процесса зажигания больших объемов топлива академик Зельдович Я.Б. в математической теории горения называет конвективное зажигание.

Однако только в работах Гостинцева Ю.В. и акад. Фортова В.Е. это

утверждение получило экспериментальное и теоретическое подтверждение. В результате этих исследований установлен автомодельный закон распространения и фрактальная структура поверхности расширяющегося турбулентно-сферического пламени (см., например: Доклады академии наук. Физическая химия. – 2004. – Т.397. – №1. – С. 68-71; и Химическая физика. – 2008. – Т.27. – №6. – С. 27-31). Авторами экспериментально обнаружен и теоретически обоснован эффект существования предельного автомодельного режима ускоренного распространения свободного турбулентного сферического пламени в предварительно перемешанной газовой смеси. Установлено, что динамика изменения такого режима обусловлена последовательным развитием во времени процессов спонтанной неустойчивости, искривления и фрактализации его поверхности, автотурбулизации зоны горения и ускоренного её расширения.

При этом скорость генерации турбулентной энергии в химически реагирующей изотропной среде определяются ламинарными характеристиками горения, а развитие крупномасштабной турбулентности – тейлоровской неустойчивостью границы раздела продуктов горения и исходной смеси, ускоренно движущейся в сторону более плотной среды по автомодельному закону.

Из анализа крупномасштабных экспериментов по распределению от центра свободных сферических пламен в больших (до 2 тыс. м³) объемах перемешанных газовых смесей, ограниченных резиновой или полиэтиленовой оболочкой, установлено, что видимая скорость пламени может достигать нескольких сот метров в секунду.

Если предположить, что ОШ зажигается также от точечных источников (электрическая искра, пламя горелки), то распространение пламени от такого локального источника в результате конвективного теплообмена в ядре ОШ может закончиться в течении долей и единиц секунд. Место и время зажигания паровоздушного облака после его образования является случайными величинами. Возможно, этим объясняется разброс времени горения ОШ, предложенных формулах горения (1).

При математическом моделировании огненных шаров в литературе предлагается множество подходов и моделей – экспериментальных, полужимических, теоретических. При установлении адекватности разрабатываемых моделей результаты расчетов сравниваются с экспериментальными формулами (1).

В теоретических моделях горения газов в ОШ, сложная внутренняя структура ОШ изучается с привлечением моделей и методов, разработанных в гидродинамике конвективных течений и теории радиационного переноса. Согласно этому подходу, скорость горения лимитируется процессом турбулентного смешения компонентов горючей смеси, тогда как сама химическая реакция считается бесконечно быстрой.

Одна из последних газодинамических моделей выполнена международным коллективом под руководством Махвиладзе Г.М в Университете Центрального Ланкашира, Престон, Великобритания и Институте проблем механики РАН, Москва, Россия. Скорость турбулентного горения описывалась моделью дробления турбулентных вихрей, согласно которой скорость потребления горючего лимитируется процессами турбулентного смешения компонентов, тогда как сама химическая реакция считается бесконечно быстрой. Реакция предполагается одностадийной и необратимой, скорости образования и потребления компонентов связаны со скоростью горения ω массовыми стехиометрическими коэффициентами.

В последнее время развивается подход, основанный на применении методов теории тепломассообмена, для построения инженерных моделей горения газовых смесей. Рассматривая фронт горения как межфазную поверхность между горючим и окислителем, используется теория пограничного слоя для построения расчетных моделей диффузионного горения водорода. Излучение продуктов горения углеводородных газов аппроксимируется законом Стефана-Больцмана с эффективным коэффициентом излучения. Правомерность этого подхода подтверждена многочисленными опытными данными в широком диапазоне изменения параметров типовых процессов переноса массы и энергии.

В связи с изложенным, построение вычислительных моделей горения на основе фундаментальных экспериментальных данных по влиянию физико-химических факторов на скорость распространения пламени, методов теории теплообмена, интегральных характеристик теплового излучения газовых смесей представляет определенный теоретический интерес и прикладное значение.

ГЛАВА 2. ДИНАМИЧЕСКАЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ МОДЕЛЬ КРУПНОМАСШТАБНОГО ГОРЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ГАЗОВ

Во 2-й главе обосновывается новая двухзонная модель горения углеводородных газов в структуре ОШ, приводится алгоритм численного решения вычислительной модели, анализируются результаты вычислительного эксперимента.

Так как в газодинамических моделях процесс горения происходит внутри ОШ или в приповерхностной зоне, в кинетических – на поверхности ОШ. Очевидно, возможен третий, комбинированный вариант с объемным горением газовой смеси внутри ОШ и нормальным распространением пламени от поверхности ОШ к эпицентру. При этом в ядре ОШ продукты реакции с одной стороны нагревают исходную смесь и увеличивают скорость реакции, с другой стороны – выступают как инертные примеси, уменьшающие концентрацию реагентов и скорость химического превращения. Продукты реакции от поверхностного горения должны истекать в окружающее пространство. Действительно, образующаяся паровоздушная смесь одного моля метана с воздухом даже в стехиометрическом соотношении занимает объем только $0,236 \text{ м}^3$. Если рассчитать объем продуктов горения при сжигании 1 моля метана по эмпирическим формулам, то он будет равен $1,5 \text{ м}^3$ и $1,41 \text{ м}^3$ соответственно. Объем тех же продуктов горения при температуре 2000°C по уравнению состояния составит $1,96 \text{ м}^3$. Значит, приблизительно четверть объема продуктов горения истекает в окружающее пространство.

В данной работе предлагается двухзонная физико-химическая модель, схематично представленная на рис. 3, в которой горение паровоздушной смеси может проходить как в объеме ОШ, так и на его поверхности. Следует отметить, что аналогичный подход применяется в химической технологии при описании сложной гидродинамической структуры потоков виртуальной моделью сопряжения зон идеального перемешивания и идеального вытеснения.

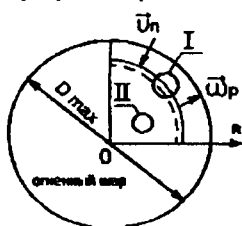


Рис. 3. Структура сферического пламени.

В первой зоне (I, рис. 3) происходит поверхностное горение на границе ОШ, во второй (II, рис. 3) – объемное диффузионное горение частично перемешанной газовой смеси.

Вычислительная модель. Обоснование физической модели позволяет сформулировать математическую постановку задачи. Математическая модель представляет систему уравнений химической кинетики, энергии, неразрывности, движения, состояния и излучения. Условия однозначности задаются начальными значениями переменных при нормальных условиях и граничными условиями.

Уравнения химической кинетики записываются для каждой зоны ОШ. В ядре ОШ процесс горения суммарным образом считается мономолекулярным по горючему:

$$\frac{dC}{dt} = -kC. \quad (3)$$

При $\tau = 0$, $C = C_0$; при $\tau = \tau_k$, $C = C_k$, где C_0 , C_k – начальная и конечная массовая концентрация топлива, τ_k – время горения ОШ, k – кинетический коэффициент.

Кинетический коэффициент включает в себя влияние физических, химических и газодинамических факторов.

Нормальная скорость распространения пламени – u_n на поверхности ОШ рассчитывается из экспериментальной зависимости стандартной скорости горения топлива от начальной температуры подогрева горючей смеси, концентраций горючего и окислителя:

$$u_n = u_0 \left(\frac{T_{\text{под}}}{273} \right)^2 \frac{aC}{C_0} \cdot \frac{bC_{\text{ок}}}{C_0}, \quad (4)$$

где u_0 – стандартная скорость горения; $T_{\text{под}}$, K – температура подогрева горючей смеси; $C_{\text{ок}}$ – концентрация окислителя; a , b – эмпирические коэффициенты.

Все зависимости скорости распространения пламени от избытка топлива, окислителя и инертных примесей при интегральной оценке являются практически линейными. Важное прикладное значение имеют данные рис. 2, т.к. при горении ОШ продукты реакции можно принять в качестве инертных разбавителей.

Предварительный подогрев смеси вводит в систему дополнительное количество тепловой энергии и повышает энтальпию горящих газов, температуру горения и, как следствие, скорость горения.

Очевидно, увеличение скорости горения связано не только с ростом температуры горения, но и с генерированием турбулентности во фронте горения.

В сферической системе координат уравнение энергии записывается в виде:

$$c_p(t)\rho(t)\frac{\partial t(r,\tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial r} \lambda_{\text{экв}} \frac{\partial t}{\partial r} + \lambda_{\text{экв}} \frac{2}{r} \frac{\partial t}{\partial r} - w(r,\tau) + QkC, \quad (5)$$

краевые условия:

$$\tau = 0, \quad t(r, 0) = t_0,$$

$$r = R, \quad t(R, \tau) = t_r; \quad r = 0, \quad \frac{\partial t(0,\tau)}{\partial r} = 0,$$

где c_p , ρ , t , $^{\circ}\text{C}$ – теплоемкость при постоянном давлении, плотность, температура газовой смеси, состоящей из горючего (углеводороды), окислителя (кислорода воздуха) и продуктов горения (углекислого газа и паров воды); r – сферическая координата; τ – время; Q – теплота химической реакции; $\lambda_{\text{экв}}$ – эквивалентный коэффициент теплопроводности, определяемый из критериальных уравнений теплообмена в ограниченном пространстве, $w(r,\tau)$ – объемный источник излучения, C – концентрация топлива, t_r – температура горения.

Если начальный объем ОШ разделить на n равных эквимольных объемов, то данное уравнение можно записать в одномерной постановке без второго слагаемого в правой части уравнения. Такой подход значительно упрощает запись и решение

остальных уравнений переноса и химической кинетики. Кроме того, при численном интегрировании шаг по координате получается обратно пропорциональным градиенту температуры.

Чтобы определить скорость расширения газа как функции температуры, необходимо совместно решать уравнения неразрывности, движения и состояния по направлению эйлеровой координаты r :

$$\frac{\partial \rho_n}{\partial \tau} + u_n \frac{\partial \rho_n}{\partial r} = 0; \quad \frac{\partial \omega}{\partial \tau} + \omega \frac{\partial \omega}{\partial r} = 0; \quad \frac{p}{\rho_0} = \frac{T_0}{T}. \quad (6)$$

Количественное описание сложных явлений и процессов теплообмена внутри сферы диаметром сотни метров и разницей температур до тысячи градусов является сложной задачей. Поэтому конвективный теплообмен в ядре ОШ моделируется введением эффективного коэффициента теплопроводности, который определяется из критериальных уравнений теплопередачи в ограниченном пространстве:

$$\lambda_{\text{эв}} = \varepsilon_k \lambda_0, \quad (7)$$

где ε_k – коэффициент конвекции. Несмотря на условность такой обработки, все имеющиеся в литературе опытные данные по теплопередаче для плоских, цилиндрических, шаровых прослоек хорошо укладываются на одну общую функциональную зависимость

$$\varepsilon_k = f(GrPr), \quad (8)$$

где Gr, Pr – критерии Грасгофа и Прандтля соответственно. При значениях $10^6 < (GrPr) < 10^{10}$, $\varepsilon_k = 0,4(GrPr)^{0,25}$

Интенсивность излучения продуктов горения аппроксимируется законом Стефана-Больцмана с эффективным коэффициентом излучения ε :

$$q = \varepsilon \sigma \left(\frac{T_{\text{нэл}}}{100} \right)^4, \quad (9)$$

где σ – константа излучения; $T_{\text{нэл}}$ – максимальная температура на поверхности или в ядре ОШ.

Тогда из баланса энергии излучения в объеме и на поверхности ОШ

$$w(r, \tau) = \frac{3q}{R}. \quad (10)$$

Исходные дифференциальные уравнения аппроксимируется системой разностных соотношений. Учитывая послойное горение газа, объем исходной смеси делится на n равных объемов V_i . Ширина i -го объема, является шагом интегрирования по координате. Его значение уменьшается от центра к поверхности сферы. Каждый i -ый объем содержит одинаковое количество молей горючей смеси v_i при температуре t_i , теплоемкости c_i , плотности ρ_i и теплопроводности λ_i .

Алгоритм численного решения вычислительной модели реализуется в несколько этапов. На каждом этапе используется принцип расщепления сложных сопряженных процессов тепломассообмена. С этой целью временной шаг интегрирования делится на несколько равных дробных шагов по времени. На каждом дробном шаге оценивается влияние сопряженных кинетических (химических), энергетических и газодинамических процессов на температурное поле ОШ. Доказано, что совокупный эффект от дробных шагов эквивалентен решению уравнения при целом шаге интегрирования. Предлагаемый подход позволяет не только упростить решение поставленной задачи, но и оценить влияние каждого процесса на динамику изменения характеристик и параметров процесса горения топлива как в объеме ОШ, так и на его поверхности.

Алгоритм решения вычислительной модели реализован в виде комплекса компьютерных программ. Результаты вычислительного эксперимента по моделированию процессов горения углеводородных газов в структуре сферического пламени представлен на рис. 4.

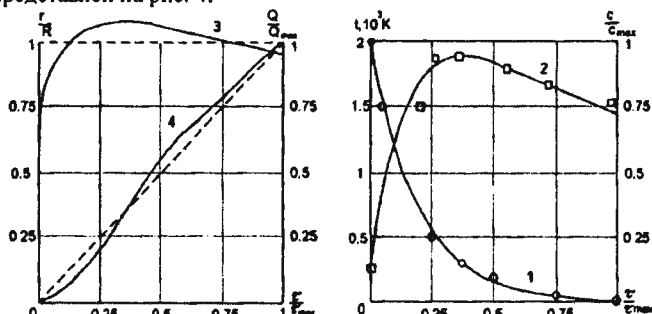


Рис. 4. Зависимость концентрации топлива (1), температуры газовой смеси в ОШ (2), относительных радиуса (3), энергии излучения (4) от времени горения топлива:

- — — экспериментальные зависимости;
- , □ — эксперимент с массой топлива до 1 т;
- динамическая вычислительная модель.

Сравнение результатов расчета характеристик горения метано-воздушной смеси при аварийном выбросе топлива в диапазоне массы от 1 до 5 000 тонн с экспериментальными данными подтверждает адекватность вычислительной модели, реальным данным с точностью $\pm 20\%$.

Моделирование горения углеводородных газов в структуре сферического пламени позволяет количественно описать динамику физико-химических процессов как на поверхности ОШ, так и в его объеме в широком диапазоне массы аварийного выброса топлива. Как видно из данных рис. 4, в первой четверти периода времени горения ОШ скорости горения и тепловыделения принимают относительно наибольшие значения, что приводит к нагреву, расширению газовой смеси и увеличению диаметра шара от начального до максимального значения. В экстремальной точке изменения диаметра ОШ скорость расширения газовой смеси за счет тепловыделения химических реакций становится равной сумме скоростей уменьшения диаметра ОШ за счет излучения и нормального распространения пламени на поверхности ОШ. В оставшиеся приблизительно три четверти периода скорость излучения превалирует над скоростью горения, и диаметр шара уменьшается до тех пор, пока не прекратятся все химические реакции.

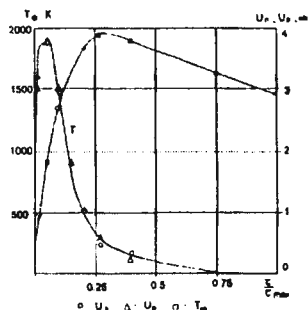


Рис. 5. Изменение нормальной скорости горения на поверхности ОШ и температуры подогрева горючей смеси.

Действительно, как видно из рис. 5, значение нормальной скорости распространения пламени на поверхности ОШ u_n по (6) и по уравнению неразрывности для n -го поверхностного слоя u_p

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -u_p \frac{\partial \rho}{\partial x} \quad (11)$$

практически совпадает и соответствует экспериментальным данным. Из (11) следует, что при резком росте температуры, связанной со скоростью химической реакции в ядре ОШ, модуль производной плотности горючей смеси по времени возрастает, а по координате, наоборот, убывает. Оба фактора влияют на увеличение u_n .

Так как на значение u_n влияние оказывают два конкурирующих механизма – подогрев смеси и уменьшение концентрации компонентов смеси, то изменение скорости имеет экстремум, в котором влияние обоих механизмов компенсируется. При дальнейшем горении ОШ, второй фактор превалирует и скорость горения и, следовательно, температура горения уменьшаются.

ГЛАВА 3. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО ПОРАЖЕНИЯ ЧЕЛОВЕКА

В 3-й главе обосновываются различные термодинамические и медицинские критерии возникновения термических ожогов. Приводятся выводы новых пробит-функций для различных термодинамических и медицинских критериев. Описывается автоматизированный вычислительный алгоритм прогнозирования опасных зон теплового поражения человека.

В решении проблемы прогнозирования опасности воздействия излучения ОШ на человека наиболее важным аспектом является обоснование критериев теплового поражения. В медицине количество физических, биологических, химических поражающих воздействий, представляющих опасность для жизнедеятельности человека, условно называют «дозой». Следствием воздействия опасных факторов на человека могут быть ожоги и отравления различной степени, шок, потеря сознания, летальный исход, условно называемые «эффekten». «Эффект», зависящий от множества трудноформализуемых объективных и субъективных факторов, является случайной величиной. Основная задача математической статистики в медицине состоит в установлении количественных соотношений между «дозой» и «эффekten». Установление критической «дозы», вызывающей «эффekten» определенной тяжести, проводится в экспериментах с варьированием количества «дозы».

При тепловом поражении человека в качестве критерия «дозы» приняты следующие термодинамические параметры:

$$\text{индекс облучения } I = q^{4/3} \cdot \tau \cdot 10^{-4}; \quad (12)$$

$$\text{логарифм индекса облучения } D = \ln I;$$

температура структурных слоев кожного покрова T.

Общепринятыми медицинскими критериями «эффекта» по глубине поражения являются ожоги I, II, IIIA, IIIB, IV степени. Во многих экспериментальных исследованиях термических ожогов в качестве критерия возникновения ожога принимается математическое ожидание порогового значения «дозы», вызывающей ожоги II степени.

Накопленный в течение нескольких десятилетий экспериментальный материал в ведущих отечественных и зарубежных научных ожоговых Центрах позволяет систематизировать результаты исследований по критическим значениям количества энергии, вызывающих ожог II степени биологических тканей с вероятностью 0,5. Выборка из этих данных представлена в таблице 1. Время экспозиции выбрано в диапазоне реального времени аварийной трансформации энергии.

Таблица 1. Критическое количество тепловой энергии, вызывающее ожог II степени с вероятностью 50%

Источник информации	Объект исследования	Механизм нагрева биообъекта	Критическое количество энергии* кал/см ²			
			время нагрева, с			
			5.6	12.0	20.0	40.0
Stoll A.M.	Кожный покров человека	Излучение	2.20	2.60	3.00	3.55
Behnke W.P.	Имитатор кожи под одеждой	Конвекция + излучение	1.95	2.40	2.90	3.56
Enalejev R.Sh.	Молочные поросята	Контактная теплопроводность	2.15	2.65	3.04	3.60
ГОСТ Р 12.3.047-98	—	—	—	3.46	—	5.24

Критерий	Скорость нагрева биообъекта – q, кДж/м ² ·с			
	15.7	8.89	6.24	3.74
Доза облучения, кДж/м ² $Q = q \cdot \tau$	87.9	106.76	124.76	149.47
Индекс дозы облучения, Дж/м ² $I = q^{4/3} \cdot \tau \cdot 10^{-4}$	220.1	221.2	229.6	231.9
Логарифм индекса, кДж/м ² $D = \ln I$	5.39	5.4	5.44	5.45

Примечание. Критическое количество энергии приведено к общей системе единиц, принятых рядом авторов, для удобства сравнения.

Как видно из табличных данных, критическое количество тепловой энергии практически не зависит от механизма нагрева биообъектов или их имитаторов, а зависит в основном от времени воздействия. Однако представленные данные

необходимы, но не достаточны для расчета зон теплового поражения и построения полей рисков.

В многочисленных опытах с биообъектами установлено, что вероятность «эффекта» приближается к нормальному закону распределения, если в качестве критерия «дозы» взят логарифм индекса облучения. Вероятность возникновения «эффекта» можно определить по таблицам или рассчитать интегрированием нормированной плотности нормального распределения стандартной случайной величины. В первом приближении за стандартную случайную величину можно принять нормированное значение логарифма индекса облучения t_0

$$t_0 = \frac{\ln I - m_{\ln I}}{\sigma_{\ln I}}, \quad (13)$$

где $m_{\ln I}$ – оценка математического ожидания индекса облучения, $\sigma_{\ln I}$ – оценка среднеквадратического отклонения $\ln I$ от $m_{\ln I}$.

Экспериментальное определение $\sigma_{\ln I}$ требует большого количества параллельных опытов с биообъектами в широком диапазоне изменения индекса облучения. Поэтому специалистами используется другой подход, основанный на определении зависимости $Pr(I)=f(\ln I)$, получившей название пробит-функции (probability unit) или уравнения регрессии «доза-эффект»: $Pr=a+b(\ln I)$, где a и b – коэффициенты, идентифицируемые в экспериментах по воспроизведению ожогов $Pr=t_0+5$. Очевидно, для каждого медицинского критерия значения этих коэффициентов будут отличаться.

Так как пробит-функция является линейной, то для её построения требуется не менее двух экспериментальных точек с координатами «доза – эффект». Графики пробит-функций представлены на рис. 6.

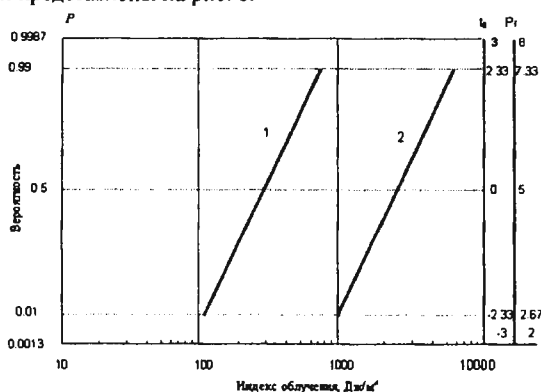


Рис. 6. Пробит-функции для различных медицинских критериев теплового поражения:

- 1 – ожог II степени ($t_0 = -16,4 + 2,99 \ln I$);
- 2 – летальный исход ($t_0 = -19,9 + 2,56 \ln I$).

Как видно из данных таблицы и рис. 6, диапазоны индексов облучения для критериев летального исхода и ожога II степени существенно отличаются между собой. Например, индекс дозы 1% вероятности летального исхода больше, чем индекс дозы для 99% вероятности ожога II степени. Для более полной

информативной оценки зон теплового поражения необходимо учитывать различные медицинские критерии опасности с целью проведения организационно-технических мероприятий по спасению людей и оказанию медицинской помощи.

Однако в ГОСТах и методиках МЧС России для оценки опасности поражающего действия теплового излучения применяется пробит-функция только для критерия летального исхода, предложенная в свое время Эйзенбергом после обработки результатов воздействия на человека теплового излучения огненных шаров атомных взрывов:

$$Pr = -14,9 + 2,56 \ln I. \quad (14)$$

Функция (14) идентична функции для летального исхода (Рис. 6) в координатах «вероятность – доза», но в координатах «нормированный интервал – доза» увеличена на пять единиц. Это приводит к необходимости пользоваться специальными таблицами интеграла вероятностей или рассчитывать его для переменного верхнего предела интегрирования, уменьшенного на пять единиц.

Следовательно, альтернативный вариант применения стандартных таблиц интеграла вероятностей для нормированного отклонения логарифма доз, вычисляемых по формулам для ожогов II степени и летального исхода (Рис. 6), является более простым и информативным.

Автоматизированный метод прогнозирования опасных зон поражения.

Для предварительной оценки вероятности поражения с применением различных критериев при заданных интенсивности излучения и времени его воздействия можно воспользоваться графиками пробит-функций и стандартной таблицей интеграла вероятностей. После определения параметров пробит-функции последняя используется в двух возможных вариантах. Либо для заданной вероятности определяются значения медицинского критерия и величины критических «доз». Либо, задаваясь критическими значениями «доз», по пробит-функциям определяют вероятность теплового поражения для заданной степени ожога. При автоматизированной вычислительной процедуре последовательно рассчитываются индекс дозы облучения, нормированные отклонения (Рис. 6) и вероятность теплового поражения численным интегрированием распределения Гаусса:

$$P = 0,0013 + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-3}^{t_0} e^{-t^2/2} dt, \quad (15)$$

где 0,0013 – значение интеграла вероятностей в интервале от ∞ до минус 3.

В качестве примера на рис. 7 приводится алгоритм автоматизированного расчета зон теплового поражения.

После запуска компьютерной программы задаются всего два параметра: масса аварийного выброса топлива M_0 и вероятность теплового поражения $P_{\text{кр}}$ для заданного медицинского критерия термического поражения. Необходимо определить расстояние от эпицентра ОШ до биообъекта, который с заданной вероятностью может получить термический ожог заданной степени тяжести.

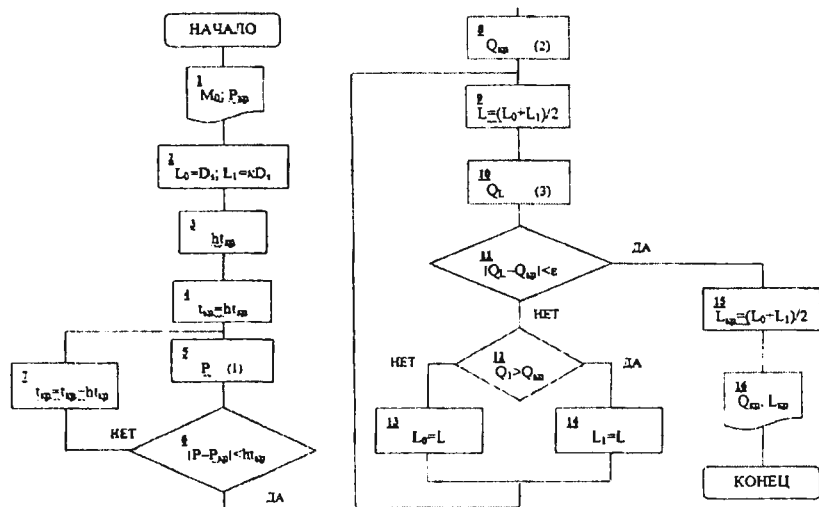


Рис. 7. Алгоритм автоматизированного расчета зон теплового поражения.

Таким образом, предлагаемые авторами динамическая модель горения огненного шара, различные медицинские и термодинамические критерии теплового поражения человека расширяют возможности ГОСТированных методов для оценки зон теплового поражения и принятия управленческих решений по предупреждению последствий массового поражения тепловым излучением при пожарах на химических и нефтехимических предприятиях.

ВЫВОДЫ

1. На основе анализа теоретических моделей горения углеводородных газов в структуре сферического пламени; физических моделей образования, зажигания, горения и теплового излучения огненного шара; влияния различных физико-химических факторов на нормальную скорость распространения пламени в газовых смесях предложена новая модель двухзонного горения огненного шара, при авариях на химических и нефтехимических предприятиях с наиболее катастрофическими последствиями для окружающей среды и обслуживающего персонала.

2. Вычислительным экспериментом установлена адекватность предложенной модели данным, полученным при обобщении наблюдений за последствиями реально произошедших аварий, а так же результатам специальных экспериментов.

3. Показано, что использование для оценки поражающего воздействия теплового излучения пробит-функции только для критерия летального исхода не обеспечивает полной объективности оценки последствий происходящих аварий, а, следовательно, и должного качества разрабатываемых организационно-технических мероприятий. Предложено повысить информационную достоверность оценки зон теплового поражения человека за счет введения в оценку теплового воздействия зон достижения ожогов II степени. Обработкой данных ведущих отечественных и зарубежных ожоговых центров установлена пробит-функция для указанного критерия.

4. Разработан комплекс программ «источник излучения – биообъект» предназначенный для обоснованного прогнозирования последствий воздействия теплового излучения на окружающие объекты, который используется в проектных организациях (ООО научно-проектная фирма «Реконструкция», ООО «Эксперт Бюро» и проектный институт «Союзхимпромпроект» КГТУ) в части разработки разделов мероприятий по предупреждению ЧС, пожарной безопасности и оценки степени рисков.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в следующих материалах:

1. Хайруллин И.Р. Прогнозирование опасности теплового излучения / Еналеев Р.Ш., Теляков Э.Ш., Хайруллин И.Р., Гасилова Ю.В. // Сборник трудов XX Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях». – Ярославль, 2007. – Т.3. – С. 190-193.

2. Хайруллин И.Р. Анализ опасности теплового излучения сферического пламени / Еналеев Р.Ш., Теляков Э.Ш., Хайруллин И.Р., Гасилова Ю.В. // Тезисы докладов XVI Школа-семинар молодых ученых под руководством академика РАН А.И.Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках». – Санкт-Петербург, 2007. – Т.2. – С. 17-20.

3. Хайруллин И.Р. Оценка опасности энергонасыщенных систем / Еналеев Р.Ш., Теляков Э.Ш., Хайруллин И.Р., Качалкин В.А., Осипова Л.Э.// Материалы докладов Международной научно-технической и методической конференции «Современные проблемы специальной технической химии». – Казань, 2007. – С. 227-233.

4. Хайруллин И.Р. Горение газов в огненном шаре / Еналеев Р.Ш., Теляков Э.Ш., Хайруллин И.Р., Качалкин В.А. // Тезисы докладов и сообщений VI Минского международного форума по тепломассообмену. – Минск, 2008. – С. 327-329.

5. Хайруллин И.Р. Критерии опасности теплового поражения человека / Еналеев Р.Ш., Теляков Э.Ш., Хайруллин И.Р., Качалкин В.А. // Безопасность жизнедеятельности. – 2008. – № 8. – С. 40-43.

6. Хайруллин И.Р. Моделирование крупномасштабного горения углеводородных газов / Еналеев Р.Ш., Теляков Э.Ш., Хайруллин И.Р., Качалкин В.А., Закиров А.М., Закиров Г.М. // Известия ВУЗов. Проблемы энергетики. – 2008. – № 11-12. – С. 26-31.

7. Хайруллин И.Р. Двухзонная модель горения газов в структуре огненного шара / Еналеев Р.Ш., Теляков Э.Ш., Хайруллин И.Р., Качалкин В.А. // Сборник докладов XIV Симпозиума по горению и взрыву. – Черноголовка, 2008. – С. 61-63.

Соискатель



И.Р. Хайруллин

Подписано в печать 10.11.08
Усл. печ. л. 1,5 Заказ №76

Формат 60х90 1/16
Тираж 100 экз.

Типография ФГНУ ВНИВИ (г. Казань)
Адрес: 420075, г. Казань, Научный городок-2